



Received: 2023/11/23
Revised: 2023/12/02
Accepted: 2023/12/29
Published: 2023/12/31

***Corresponding Author:**

Min-Gyu Jeon

Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si, Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-5335

E-mail: mgjeon@navy.ac.kr

2중관 난류화염의 온도 및 농도 동시 계측

Simultaneous Measurement of Temperature and Concentration in Turbulent Double-pipe Flame

전민규*

해군사관학교 기계시스템공학과 조교수

Min-Gyu Jeon*

Assistant Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, ROK Naval Academy

Abstract

본 논문에서는 2중관 구조의 버너를 구성하여 난류화염을 완성하였다. 메탄-공기 예혼합 화염의 온도 및 농도장 측정에 비접촉식 흡수분광학 방식인 CT-TDLAS를 적용하여 연소생성물인 물 분자의 온도 및 농도장을 동시에 계측하였다. 고온측정의 정확성을 높이기 위해 단일 레이저 및 복수 레이저를 비교 평가하였다.

In this paper, a double-tube structure burner was designed to achieve a turbulent flame. The CT-TDLAS, a non-contact absorption spectroscopy method, was utilized to measure the temperature and concentration field of methane-air premixed flames. Simultaneously, the temperature and concentration field of water molecules, as combustion products, were measured. To enhance the accuracy of high-temperature measurements, a comparison and evaluation were conducted between a single laser and multiple lasers.

Keywords

컴퓨터 단층촬영(Computer Tomography), 동시 측정(Simultaneous Measurement), 온도(Temperature), 농도(Concentration), 난류(Turbulent)

Acknowledgement

본 논문은 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

이 논문은 2023년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

최근 KF-21 및 한국형발사체 누리호 등의 개발로 우주 탐사에 관한 국내외 관심이 높다. 연구개발을 위해서 필수적인 고화력의 연소 시스템은 군사 및 민간 영역에서 다양한 목적으로 개발되고 있다. 이러한 연소 시스템에서 연소 상태를 이해하고 제어하기 위해서는 정밀한 계측기술이 동반되어야 한다.

연소의 특성을 이해하기 위해 일반적으로는 열전대를 사용하여 온도를 계측한다. 해당 기술은 접촉식 1점 표본 추출법으로 공간에 대한 정확한 정보를 제공하기 어렵다[1-3]. 또한 접촉식 측정 방식의 한계로 연소의 흐름을 방해할 가능성이 높고 연소실 내부와 같이 센서를 부착하기 어려운 공간에서는 측정이 불가능하다. 해당 문제를 해결하기 위해 개발된 TDLAS(tunable diode laser absorption spectroscopy)은 비접촉식으로 측정 대상 가스의 온도를 계측한다[4-9]. 또한 TDLAS 기술에 토모그래피 기술을 추가 적용한 CT-TDLAS(computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy) 기술이 개발되어 2차원 온도장 측정에 적용되고 있다.

본 연구에서는 비접촉식 흡수분광학 기술인 CT-TDLAS를 이용하여 가혹조건이라 할 수 있는 2중관 난류 화염의 온도를 계측하고 연소생성물인 물 분자의 농도를 함께 측정하여 연소상태를 평가하고자 한다[10-12].

또한 온도 및 농도 측정 결과를 다중 레이저(2종류)를 사용하여 단일 레이저의 측정 불확실성을 해결하고자 한다.

2. 흡수분광학을 이용한 계측 이론

흡수분광학 기술인 TDLAS는 Lambert Beer's 법칙에 근간을 두고 있다. 특정 파장의 빛을 측정하고자 하는 대상 가스에 조사(照射)하였을 때 나타나는 흡수도를 평가하는 것이다. 이때 입사광과 투과광의 비율로 농도와 온도를 계측할 수 있다. 이는 식 (1)에 나타냈다.

$$\frac{I_{tr}(\lambda)}{I_{in}(\lambda)} = \exp\{-A_{\lambda}\} = \exp\left\{-\sum_i \left(P \cdot n_i \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) \cdot G_{vi,j}\right)\right\} \quad (1)$$

여기서, I_{tr} : 투과광,
 I_{in} : 입사광,
 A_{λ} : 흡광도,
 P : 압력,
 n_i : 종밀도,
 L : 측정 길이,
 S_{ij} : 선강도,
 $G_{vi,j}$: 확장함수.

본 연구에서는 메탄-공기 예혼합화염의 온도 및 농도를 계측하기 위해 연소생성물인 물 분자의 흡광도를 계측하였다. 이때 흡수분광학에 있어 사용되는 레이저의 파장 대역의 선정이 매우 중요하다. 따라서 물 분자의 고유 흡수파장을 고려하여 2종의 다이오드 레이저를 선정하였다.

Fig. 1은 1,388 nm 대역에서의 흡수스펙트럼을 보인다. 1,388.139 nm(#1), 1,388.328 nm(#2) 등이 대표파장이다. Fig. 2는 1,343 nm 대역에서의 흡수스펙트럼을 보인다. 대표파장으로는 1,343.298 nm을 사용한다. 물 분자의 온도가 변화함에 따라 특정 파장의 흡광도 세기 역시 변화하는데, 위 흡수스펙트럼 분석에 HITRAN database[13]를 이용하여 이론적 계산을 수행한다.

Fig. 3는 1,388 nm과 1,343 nm 파장대역에서 대표 파장인 #1, #2, #3의 온도변화에 따른 흡광도 세기 변화를 보인다. Fig. 4는 단수 레이저(1,388 nm)를 사용하였을 때 (#1/#2)의 온도 의존성을 보이며, 복수 레이저(1,388 nm + 1,343 nm)를 사용하였을 때 비율 (#3/#1)의 온도 의존성을 함께 보인다.

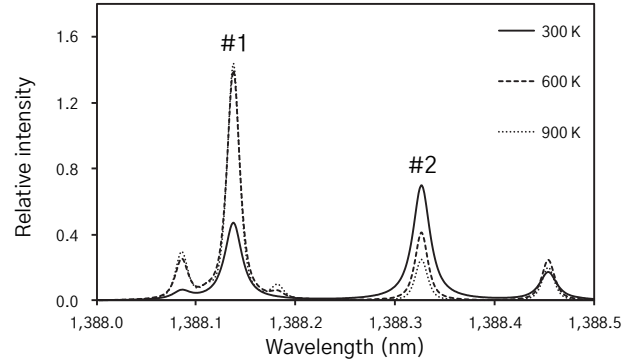


Fig. 1. The relative intensity of absorption spectra (1,388 nm)

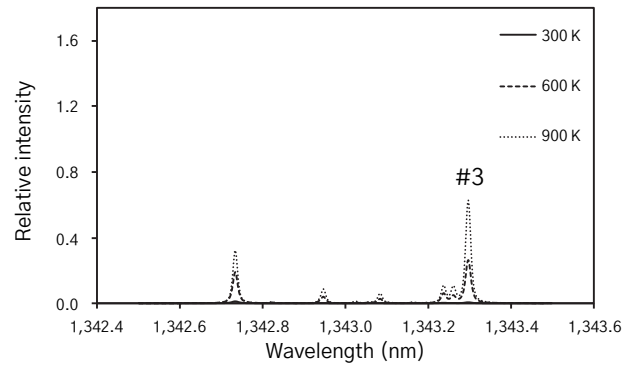


Fig. 2. The relative intensity of absorption spectra (1,343 nm)

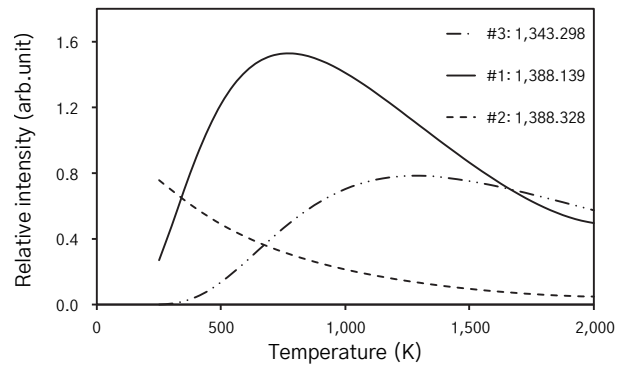


Fig. 3. Temperature dependence of absorption spectra

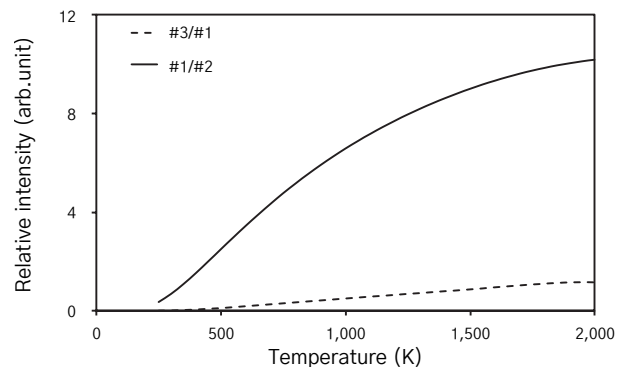


Fig. 4. Representative wavelength ratio

TDLAS는 입사광과 투과광을 측정하는 시준방식을 이용한다. 그러나 레이저가 지나간 직선 경로의 정보만을 제공하므로 2차원 이상의 공간정보를 설명하기 어렵다. 본 연구에서는 CT(computer tomography)를 추가 적용한 CT-TDLAS 기법을 활용한다. CT 계산을 용이하게 하기 위해 Fig. 5와 같이 mesh 형태로 레이저 빔을 배열하였다. 토모그래피 알고리즘에 의해 실험에 의해 측정된 모든 레이저의 강도 정보는 레이저 빔이 교차되는 격자점에 재구성되었다. 직경 70 mm의 측정공간을 재구성하기 위해 10 × 10의 grid를 구성하였다.

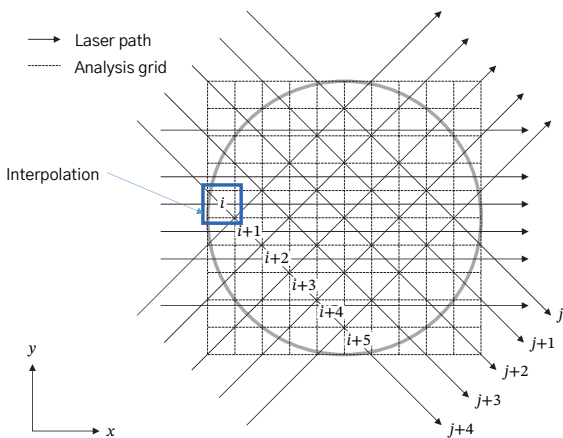


Fig. 5. Calculation grids

각 경로에서의 흡광도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$A_{\lambda,j} = - \sum_i n_i \cdot L_{i,j} \cdot \alpha_{\lambda,i} \quad (2)$$

여기서, $A_{\lambda,j}$: 흡광도,

$L_{i,j}$: 단일 그리드 i 내부의 경로 길이,

$\alpha_{\lambda,i}$: 파장의 흡수계수.

Fig. 6는 CT 계산 절차를 나타낸다. 2차원 온도 및 농도장을 실험에서 측정된 흡광도 값으로부터 재구성하기 위해 사용하였다. 실험값으로부터 초깃값을 생성하여 토모그래피 방식 중 하나인 SMART(simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique) 알고리즘[10]을 적용하여 식 (2)의 흡수계수를 수정하여 이론 흡광도와 실험 흡광도의 오차가 최소가 될 때까지 계산을 수행하여 최종 온도 및 농

도장을 재구성할 수 있다.

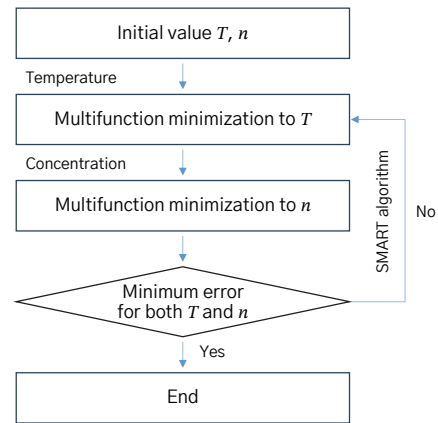


Fig. 6. Calculation flow chart

3. 흡수분광학 측정 방법

본 연구에서 연소의 가혹조건을 구현하기 위하여 Fig. 7에 나타낸 2중관 구조의 버너를 구현하여 난류화염을 완성하였다. 난류화염을 유지하기 위해서 2중관 중 내경 2 mm의 내부관에 제트류의 유량을 제공하고 내경 10 mm의 외부관에 층류 유량을 제공하였다. 해당 연소조건은 Table 1에 나와 있다.

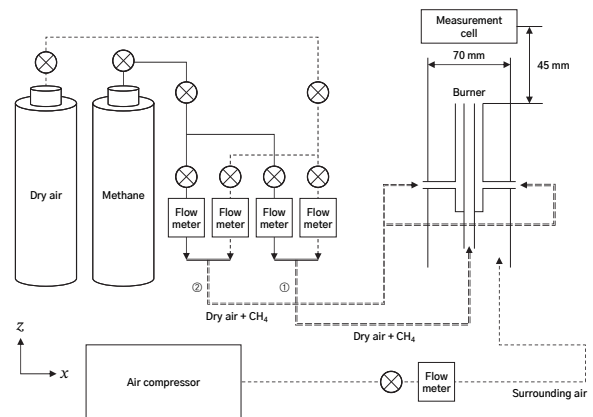


Fig. 7. Schematic diagram of experimental setup

Table 1. Combustion experimental parameters

Case	Gas	Main flame (l/min)	Sub flame (l/min)	Equivalence ratio	Reynolds No.
Turbulent	Air	5.7	2	1	4,246.09
	CH ₄	0.6	0.22	1	328.74

연소생성물 중 물 분자의 농도 및 온도를 측정하기

위하여 두 가지 유형의 레이저를 이용하였다. 작동 파장이 1,388 nm인 다이오드 레이저(DFB type, NTT Electronics Co., NLK1E5GAAA)와 1,343 nm인 두 번째 다이오드 레이저(DFB type, NTT Electronics Co., NLK1B5EAAA)를 사용한다. 또한 온도 측정 정확도를 평가하기 위해 열전대(ANBE SMT Co., BM-100-100-050, 100 μm)를 사용하여 CT-TDLAS 측정 위치와 동일하게 측정하였다.

4. 흡수분광학 측정 결과

2중관 구조의 버너를 이용하여 난류화염을 구성하고 동일 위치에 대해 열전대 측정결과와 CT-TDLAS로 재구성한 온도장을 비교·분석하였다.

Fig. 8은 난류화염의 3가지 측정 방식에 따른 온도장을 보인다. Fig. 8(a)는 3.5 mm 간격으로 열전대로 측정한 온도 값을 나타낸다. 버너의 중심이 측정 셀의 중심에 위치하여 중심부는 고온이 나타났으며 측정 셀의 외곽으로 갈수록 온도가 낮아지는 결과를 보였다. 이때 중심부의 온도는 1,725.78 K이다.

Fig. 8(b)는 CT-TDLAS 측정을 위해 단수 레이저인 1,388 nm 파장 대역만을 활용하였을 때 결과를 나타낸다. 측정 공간에 대한 분해능이 열전대에 비해 상대적으로 부족함을 확인할 수 있으며 중심부의 온도는 1,179.77 K로 큰 오차가 발생했다.

Fig. 8(c)는 복수 레이저 1,388 nm와 1,343 nm를 동시에 활용하였을 경우이며 단수 레이저 대비 열전대와 유사한 패턴의 온도장 결과를 보였다. 중심부의 온도는 1,519.60 K로 오차도 작게 나타났다.

버너의 중심부의 오차를 비교하기 위해 열전대의 경우 난류 화염의 직접적인 노출로 오차가 나타난다고 판단하여 중심부에서 측정 셀의 외곽으로 $X = -3.5$ mm인 동일 위치를 선택하여 함께 비교하였다. 이때 열전대는 1,111.07 K, 단수 레이저는 1,060.32 K, 복수 레이저는 1,088.87 K로 나타나 복수 레이저의 결과가 열전대 측정결과와 유사하게 계측됨을 검증할 수 있었다. 이와 같은 이유로 난류 화염과 같은 강한 유동이 발생하는 열 유동 계측에서의 열전대 계측의 한계를 확인했으며, 단수 레이저에 비해 복수 레이저의 계측에서 측정 정확성이 보다 높아진다는 사실을 확인할

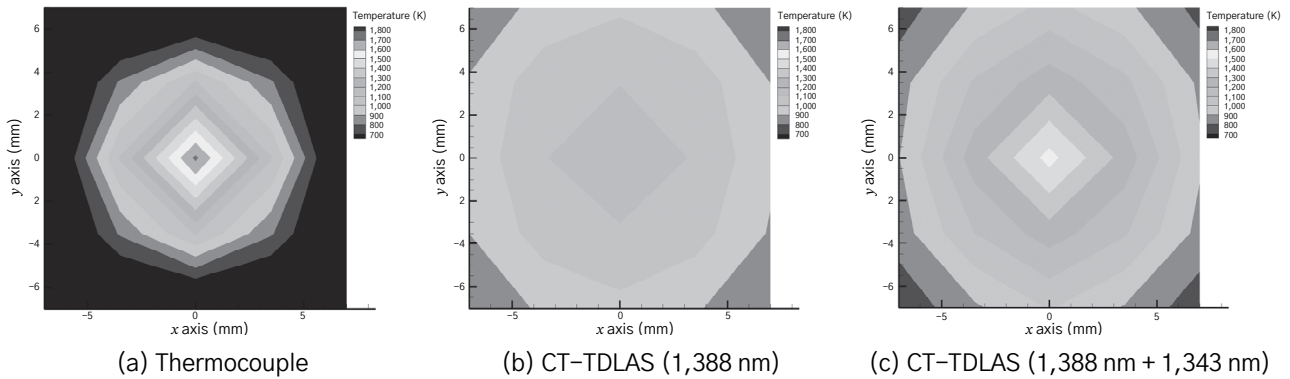


Fig. 8. Comparison of temperature distribution

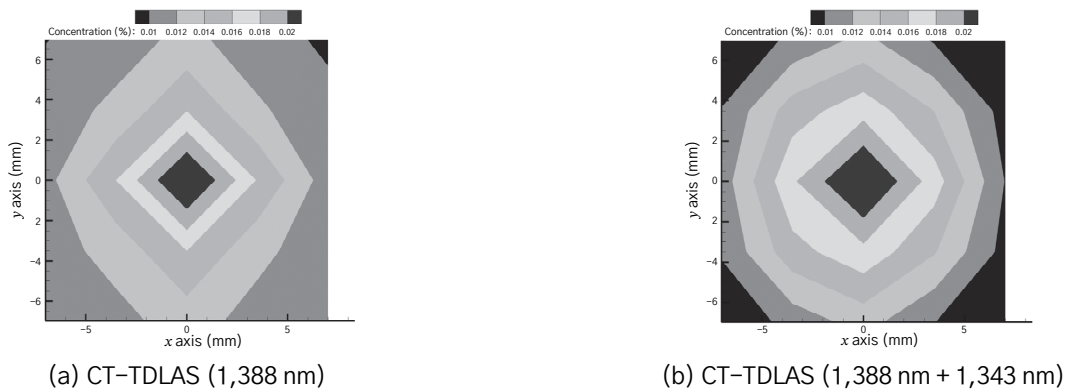


Fig. 9. Comparison of concentration distribution

수 있다.

본 연구에서는 또한 연소생성물인 물 분자의 온도 계측 뿐 아니라 농도장도 함께 재구성하였다. Fig. 9은 CT-TDLAS를 이용하였으며, Fig. 9(a)는 단수 레이저 결과, Fig. 9(b)는 복수 레이저 결과를 나타낸다. 온도장 결과와 마찬가지로 단수 레이저 대비 복수 레이저의 농도장 결과에서 보다 높은 분해능을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 난류화염을 구성하기 위해 2중관 구조를 이용하여 온도장 및 농도장을 재구성하였다. 온도장 결과를 비교하기 위해 열전대 측정값과 비교하였으며 접촉식 측정법인 열전대의 계측 오류를 줄이고자 $X = -3.5$ mm 지점의 온도 값을 이용하였다. 흡수분광학 측정법인 CT-TDLAS으로 상대비교를 수행하였으며 고온 측정의 한계를 해결하고자 단수 레이저(1,388 nm)와 복수 레이저(1,388 nm + 1,343 nm)의 결과를 함께 비교하였다. 단수 레이저의 경우 4.57 %의 상대오차가 발생하였으며, 복수 레이저는 2.09 %의 상대오차가 발생하였다. 이로써 복수 레이저가 보다 뛰어난 계측 성능을 보임을 확인할 수 있다.

또한 CT-TDLAS 측정법은 측정 가스의 농도장도 함께 나타낼 수 있어 연소상태의 정보를 심도 있게 관찰 가능하다. 따라서 직접 측정이 어려운 연소실 내부 등 계측에 본 연구에서 제안하는 복수 레이저를 이용한 CT-TDLAS를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] M. Luo, "Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment," *Journal of Fire Science*, 1997, 15, pp. 443-461.
 [2] M. V. Heitor and A. L. N. Moreira, "Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies," *Progress in Energy*

and Combustion Science, 1993, 19, pp. 259-278.

[3] S. Brohez, C. Delvosalle and G. Marlair, "A Two-Thermocouples Probe for Radiation Corrections of Measured Temperature in Compartment Fires," *Fire Safety Journal*, 2004, 39, pp. 399-411.
 [4] M. Yamakage, K. Muta, Y. Deguchi, S. Fukada, T. Iwase and T. Yoshida, Development of Direct and Fast Response Exhaust Gas Measurement, SAE Paper, 2008, 20081298.
 [5] M. Luo, "Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment," *Journal of Fire Science*, 1997, 15, pp. 443-461.
 [6] A. Yariv and P. Yeh, *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*, Oxford Univ Pr., 2006.
 [7] L. A. Kranendonk, J. W. Walewski, T. Kim and S. T. Sanders, Wavelength-agile Sensor Applied for HCCI Engine Measurement. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1), pp. 1619-1627.
 [8] G. B. Rieker et al., Rapid Measurements of Temperature and H₂O Concentration in IC Engines with a Spark Plug-mounted diode laser sensor, Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2), pp. 3041-3049.
 [9] X. Liu, J. B. Jeffries, R. K. Hanson, K. M. Hinckley and M. A. Woodmansee, Development of a Tunable Diode Laser Sensor for Measurements of Gas Turbine Exhaust Temperature, *Applied Physics B*, 2006, 82(3), pp. 469-478.
 [10] M. G. Jeon, Y. Deguchi, T. Kamimoto, D. H. Doh and G. R. Cho, Performances of New Reconstruction Algorithms for CT-TDLAS (Computer Tomography-tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115, pp.1148-1160.
 [11] D.W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi and D. H. Doh, Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(1), pp. 84-89.
 [12] Y. Deguchi and D. H. Doh, Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(1), pp.84-89.
 [13] L. S. Rothman et al., The HITRAN2008 Molecular Spectroscopic Database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, 110, pp.533-572.